Société géologique de France

Société savante fondée le 17 mars 1830
Reconnue d'utilité publique le 3 avril 1832

Réunion extraordinaire de la SGF - EXCURSION -

Vagabondage géologique

à Fontainebleau

22 avril 2019

14h30 - 17h30

Organisé dans le cadre de la JOURNÉE NATIONALE DE LA GÉOLOGIE



Organisateur :
M. Médard THIRY

Auteur de "Curiosités géologiques du Massif de Fontainebleau" BRGM éditions

avec la participation de Marie Liron et Patrick Dubreucq, co-auteurs du guide géologique.

Inscription gratuite mais obligatoire sur

geosoc.fr/fontainebleau

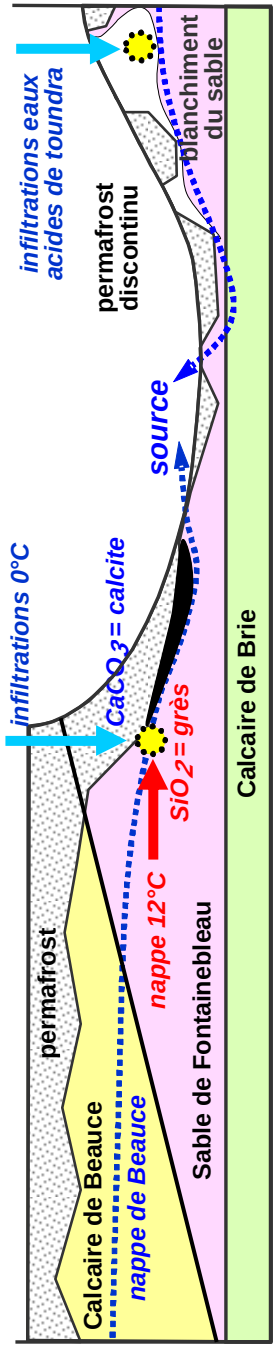
En partenariat avec

brgm
Géosciences pour une Terre durable

www.geosoc.fr

SGF
Société Géologique de France
Des géologues au service de la société

77 rue Claude Bernard, 75005 Paris
(33) (0) 1 43 31 77 35 accueil@geosoc.fr



Cadre géologique renouvelé

Les observations et les analyses des 25 dernières années ont conduit à complètement reconsidérer la géologie des Sables et Grès de Fontainebleau. Ont émergé des idées nouvelles mettant en exergue des transformations liées aux paysages glaciaires de l'Holocène.

Les sables blancs très purs exportés sur toute l'Europe pour la verrerie, les Calcites de Fontainebleau possédées par toutes les grandes collections de minéralogie, les massives dalles de grès qui arment les paysages bellifontains, ainsi que leur fracturation, sont autant de transformations qui ne sont liées ni à la sédimentation, ni à l'enfouissement des sables. Ces "altérations" se sont faites au Quaternaire, lors de la mise à l'affleurement des sables (Thiry *et al.*, 2013).

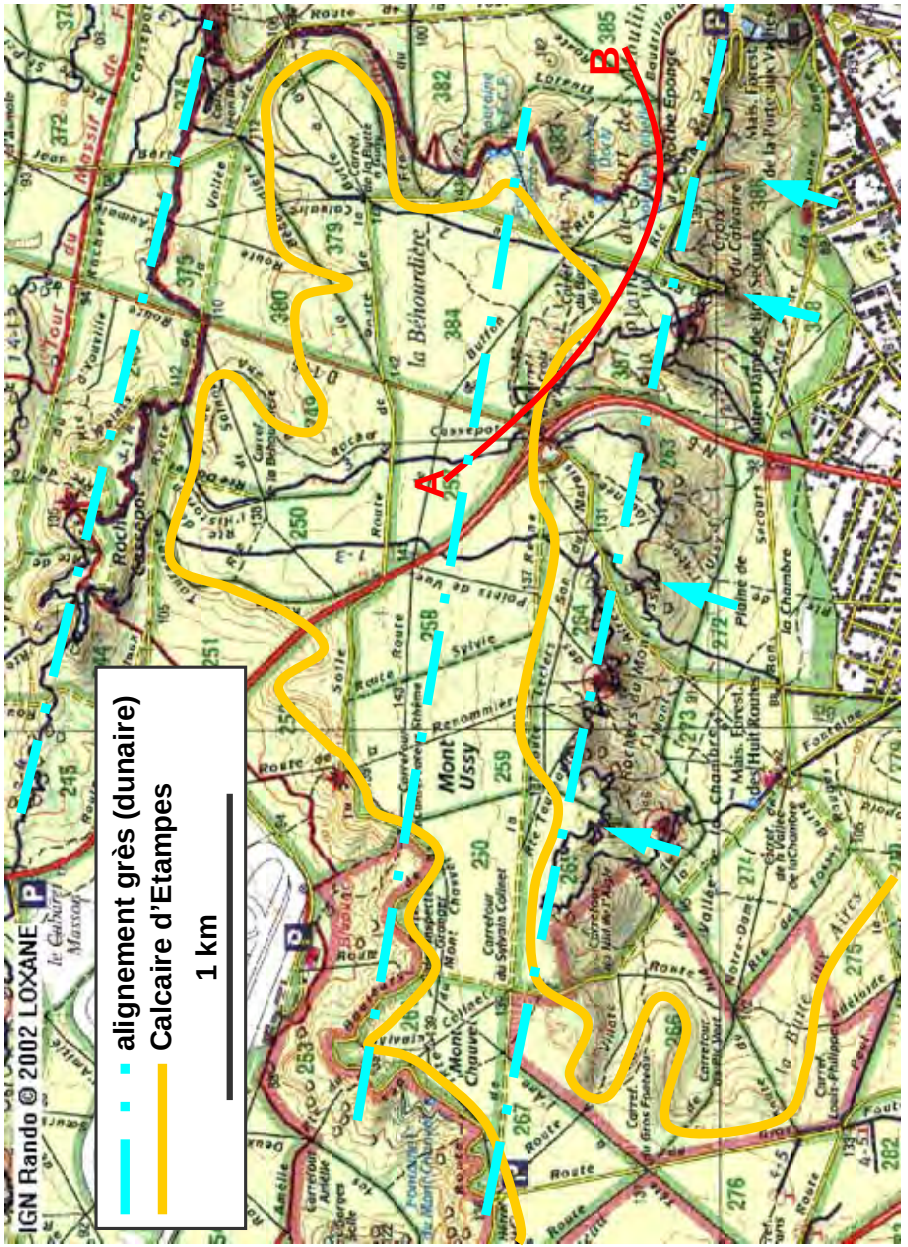
Tous ces aspects exceptionnels de la géologie du massif de Fontainebleau peuvent être réunis dans un même modèle qui donne de la cohérence à toutes les observations dispersées.

- calcites par réchauffement des eaux froides en profondeur,
- grès par refroidissement des eaux profondes près de la surface,
- blanchiment des sables par infiltration d'eaux acides de la toundra qui couvrait alors le massif.

On ne soupçonnait pas que les périodes froides avaient si profondément transformé les paysages actuels

C'est un tournant de la géologie des pays tempérés qui est en train de s'écrire à partir du Massif de Fontainebleau. Ces idées amènent à reconsidérer les nombreuses formations à sables blancs, à dalles de grès, et souvent calcites sableuses connues en France, en Europe, en Amérique du Nord et en Asie. A partir de là, les silicifications des calcaires lacustres tertiaires et les meulières, des Hamadas d'Afrique du Nord, d'Espagne, de France et d'Allemagne, doivent également être réexaminés à la lumière de ces données nouvelles et leurs interprétations paléoclimatiques reconsidérées.

Situation et cadre géomorphologique

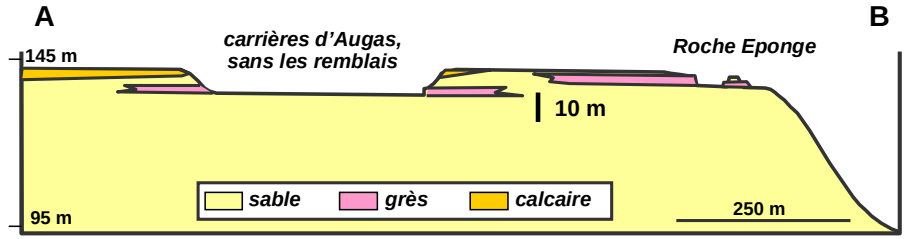


Carte de situation du secteur de la Croix du Calvaire. A-B = tracé de la coupe géologique.

Le secteur parcouru par l'excursion est encadré par deux alignements rocheux qui se superposent aux alignements dunaires du sommet des Sables de Fontainebleau Dollfus, 1911 ; Alimen, 1936). Ce sont les rochers du Fort des Moulins et du Mont Ussy qui forment le rebord Nord de la cuvette de Fontainebleau et l'alignement des rochers de la Tour Denecourt et du Cassepot, à environ 1,5 km au Nord du précédent alignement. Entre ces deux alignements "s'étale" le Calcaire d'Etampe. Le sommet des rochers et la surface du plateau calcaire étant sensiblement à la même altitude, le calcaire occupe une synforme qui correspond au remplissage de la dépression interdunaire. C'est cette structuration géologique ancienne qui sous-tend la remarquable structuration morphologique du Massif de Fontainebleau avec des alignements qui se suivent sur 12 km à travers la forêt.

Il faut noter que l'alignement qui borde la cuvette de Fontainebleau présente des saillants gréseux en travers de l'alignement et qui pointent vers l'incision du vallon de Fontainebleau. Ce sont des dispositifs inconnus (de l'auteur) ailleurs dans le Massif de Fontainebleau. Les saillants correspondent éventuellement à des cimentations en rapport avec des écoulements de la nappe vers la cuvette de Fontainebleau au début de l'incision de cette dernière.

Enfin, il n'existe pas, ou il n'est pas possible de démontrer, de dalles de grès superposées sur le coteau qui surplombe la gare. En revanche, deux niveaux de dalle sont visibles dans l'entaille de la D606 à la sortie Nord de Fontainebleau vers Melun. Par ailleurs, les profondes et vastes carrières à l'Est de la Croix d'Augas montrent une dalle de grès qui a été exploitée à environ 6-8 m sous la surface du plateau, donc bien en-dessous de la dalle de la Croix du Calvaire (coupe A-B). Cette dalle inférieure est celle visible dans l'entaille de la D606 et c'est sous elle que s'est développée la vaste grotte d'Augas qui est actuellement murée.



Coupe géologique (A-B sur la carte de situation) montrant la disposition d'au moins deux dalles de grès superposées dans le secteur de la Croix du Calvaire.

Les calcites sableuses de la Roche Eponge

Au temps des ginguettes en forêt, la Roche Éponge était l'attraction touristique la plus populaire. Sa curiosité résidait dans ses formes étranges et avait été nommée "la Roche Éponge, le Madrépore, le Polypier, la Morille, l'Ossuaire et La Sans-Pareille, la roche du Cinq-Mai". (Denecourt, 1868).

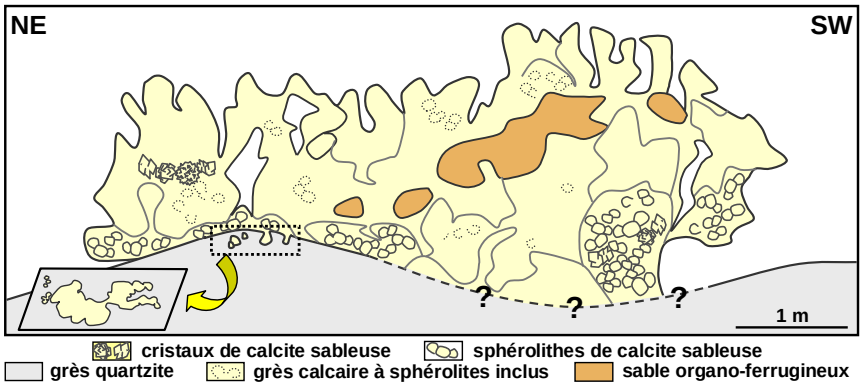
Arrangements

La Roche Éponge est formée d'un grès calcaire. Son aspect étrange est dû à son altération par dissolution de la calcite du ciment par les eaux d'infiltration.

Le grès calcaire est formé de sphérolithes dont on distingue les fantômes sur les parois des puits de dissolution. Des sphérolithes et des assemblages de cristaux de calcite sableuse forment un niveau quasi continu à la base de la roche. Le dégagement des cristaux et des sphérolithes indique qu'ils étaient contenus dans du sable non cimenté, érodé à l'affleurement. Les blocs isolés disposés autour de la roche montrent des sphérolithes coalescents avec couronne de rhomboèdres de calcite.

La roche montre aussi des sables ferrugineux riches en matière organique qui remplissent d'anciens conduits de dissolution.

Enfin, la roche repose directement sur une dalle de grès quartzite, exempte de calcite, qui apparaît tout autour du promontoire de la roche. Ce sont ces grès qui ont été exploités sur de grandes surfaces dans ce secteur. Le contact direct est visible dans la partie SE du rocher et montre des sphérolithes de calcite sableuse inclus (circonscrits) dans le grès quartzite. En revanche, on ne peut pas assurer que la dalle de grès soit continue sous toute la roche. Les puits de dissolution indiquent qu'il y a drainage vers la profondeur, il est donc vraisemblable que la dalle de grès soit interrompue sous la roche. Le haut de la Roche Éponge est légèrement en contrebas du sommet de l'épaisse dalle de grès qui forme l'ancien front de taille au SE.



Coupe schématique de la Roche Éponge. Elle repose sur une dalle de grès quartzite et montre l'inclusion de sphérolithes dans le grès quartzite.

Age

La datation par la méthode du carbone 14 d'une cristallaria de cristaux de calcite a donné un âge de 45 000 ± 2 000 ans (datation Poz-49824). C'est un âge qui correspond au dernier épisode glaciaire, comme nombre d'autres cristaux et sphérolithes de calcite sableuse des Sables de Fontainebleau et des autres sables blancs du Bassin de Paris (Auversien, Thanétien, Sparnacien) (Thiry, 2016).

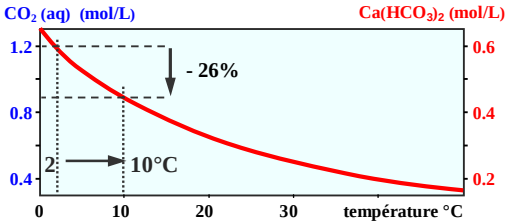
Précipitation des calcites glaciaires

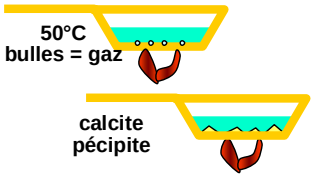
Les carbonates sont solubles sous forme de bi-carbonate, :

$Ca(HCO_3)_2$ = 2 CO_2 pour 1 Ca eaux riches en CO_2

La calcite précipite sous forme de mono-carbonate :

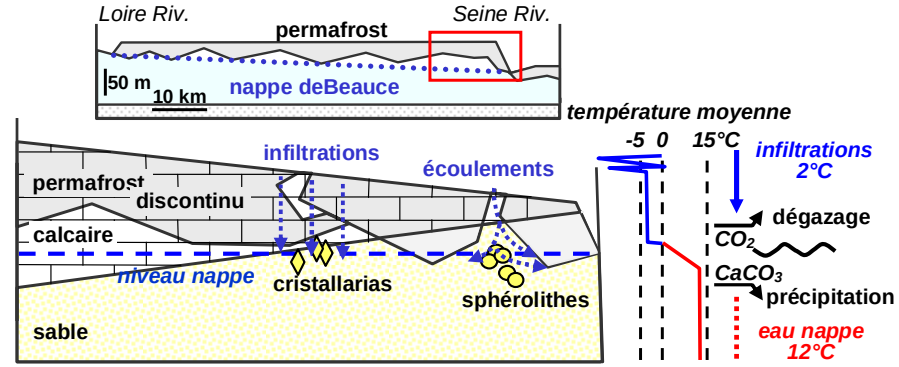
$CaCO_3$ = 1 CO_2 pour 1 Ca eaux appauvries en CO_2.





Le CO_2 est plus soluble dans les eaux froides que dans les eaux chaudes. Quand une eau se réchauffe de 2 à 10ºC elle perd 25% de son CO_2 dissout et 25% de la calcite dissoute contenue précipite. Dans votre casserole, à 50ºC c'est les 2/3 du carbonate qui précipite et entartre votre bouilloire ! … *et vous constatez que la géochimie est terriblement efficace !*

Pendant les périodes froides les sols et roches étaient gelés jusqu'à des profondeurs de 10-20-50 m et même plus dans le Bassin de Paris. Il s'établissait alors un front de température relativement abrupt entre les sols gelés et congelés et le sous-sol et les nappes qui ne subissent qu'un faible refroidissement. Les eaux froides superficielles qui s'infiltraient se réchauffaient au contact de la nappe … le CO_2 dégazait … et la calcite précipitait en cristaux ou en sphérolithes.



Hydrologie des fontaines en forêt

Les "fontaines" de la forêt sont des aménagements liés aux dalles de grès qui retiennent l'eau. La plus ancienne est la Fontaine des Ermites à Franchard, dont le supérieur des ermites écrivait en 1192 "l'eau de votre fontaine n'est ni belle à voir, ni bonne à boire". Elles ont été aménagées sur des fronts de taille du grès, pour le "tourisme" et les guinguettes.

Des eaux "pauvres" et putrides

Les dalles de grès sont imperméables et en l'absence de fissuration elles retiennent une nappe perchée dans les sables qui les surmontent. En affleurement naturel les eaux de ces nappes perchées débordent des dalles, s'écoulent à travers les sables et aliment la nappe profonde. Quand la dalle de grès est attaquée par les carrières, le front de taille intercepte cet écoulement, soit directement sur le haut de la dalle, soit plus souvent plus bas, au niveau des fractures horizontales le long desquelles l'eau s'écoule. Les fontaines se tarissent souvent l'été.

Ces nappes perchées sont alimentées par les eaux de pluie qui ont traversé les sols sableux forestiers de type podzol. Ce sont des sols acidifiés par la dégradation des matières organiques du tapis végétal et dépourvus de cations basiques. Ils sont très pauvres, formés presque exclusivement de quartz et de matière organique, typiques des landes à bruyères, bouleaux et pins.

Les eaux qui traversent ces sols sont faiblement minéralisées et acides (pH entre 4 et 5), contiennent plus ou moins de silice dissoute, sont pauvres en cations et anions (peu minéralisées = faible conductivité) et sont riches en matières organiques solubles (eaux brunes et de mauvais goût).

Tableau – Caractéristiques physico chimiques et composition des eaux de la Fontaine Dorly (février 1995). mmol/L. Analyses Bariteau (1996).

T °C	Eh (mV)	Cond (µs/cm)	O_2 (aq) (mg/L)	pH
8,8	520	84	7,2	4,3

HCO_3	F	Cl	NO_3	Na	NH_4	K	Mg	Ca	SiO_2	Al	Fe
0,20	0,05	0,19	0,1	0,22	0,08	0,03	0,02	0,13	0,02	0,11	n.d.

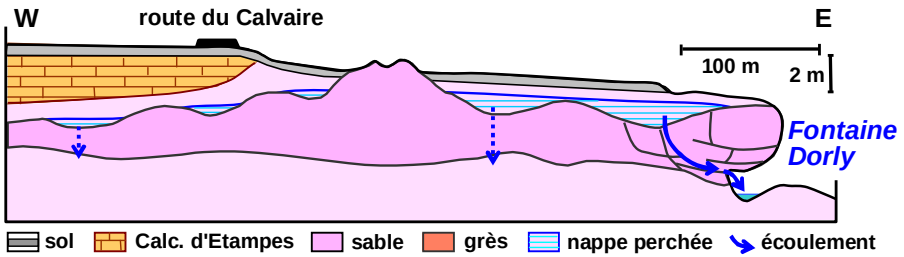


Figure – Schéma hydrologique de la Fontaine Dorly – parcelle 383).

Les anciennes exploitations de grès

rédaction et photos Patrick Dubreucq

La platière de grès du Fort des Moulins depuis la Fontaine Désirée jusqu'aux contrebas de la Croix du Calvaire en passant par la roche Éponge est l'une des nombreuses platières exploitées depuis le Moyen-Âge pour servir à la construction et au pavage des rues. Le grès du Fort des Moulins est exploité dès 1609 (Herbet, 1989) et un arrêt du conseil de Paris du 5 décembre 1667 indique que le banc de grès de la Croix du Calvaire est de bonne qualité pour le pavage des rues (Dupain, 1881). Par ailleurs, le récit de l'accident mortel d'un jeune avonnais de 20 ans indique ue la carrière du Fort des Moulins était encore en exploitation en 1838. Les carrières qui s'étendent sur une superficie de plus de 5 hectares ont laissées de nombreuses traces qui permettent de décoder le paysage lors de l'exploitation (front de taille, monticules d'écales et de déblais, chemins de vidanges) et d'expliquer une partie des techniques utilisées (traces de mortaises).

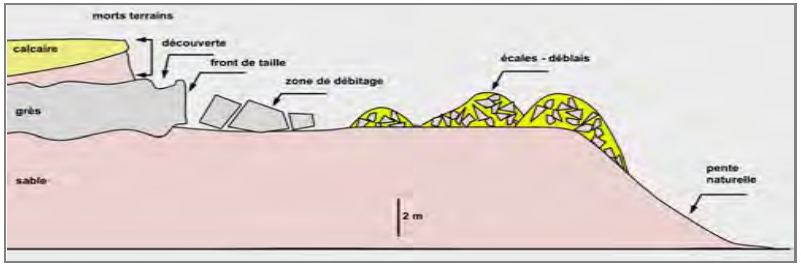


Schéma de l'organisation des exploitations de grès.

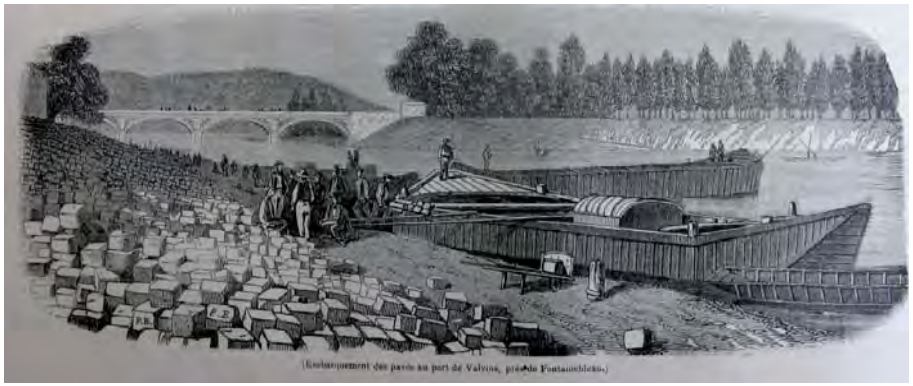
Le front de taille désigne la paroi verticale du banc de roche exploité qui varie à proximité de la Fontaine Isabelle entre 2 et 4 m d'épaisseur. Il faut au préalable dégager le dessus du banc de roche de la terre et des végétaux qui l'encombrent. A la base du front de taille on distingue une terrasse dégagée et aplanie, appelée « forme » où le carrier dédoublait, façonnait et stockait les pavés avant leur évacuation.

Les écales désignent les *"détritus de l'exploitation"* du grès fort abondants qui *"s'accumulent avec les terres de déblais derrière les carriers au fur et à mesure que ces derniers avancent" (*Domet, 1873*).* Couvrant de très grandes superficies en forêt, ils sont aujourd'hui souvent recouverts par de la végétation. Entre la Roche Éponge et la Fontaine Isabelle, le paysage est transfiguré par les monticules d'écales et de déblais séparés par des chemins de vidanges

Les produits taillés (souvent des pavés) étaient évacués de la carrière par des charrettes à chevaux qui empruntaient des chemins étroits entre les écales et appelés **chemins de vidange,** puis des routes de vidanges pour conduire les marchandises jusqu'au chantier de construction ou jusqu'au bord de la Seine, ici au port de Valvins où les pavés étaient comptés pour le paiement des carriers et des voituriers avant d'être embarqués en direction de la capitale sur des bateaux appelés « marnois » qui pouvaient contenir 7 à 8000 pavés.



[2]Eléments caractéristiques des carrières d'exploitation de grès entre la Roche Eponge et la Fontaine Isabelle. (A) front de taille ; (B) monticule d'écales à proximité du sentier n°2 ; (C) chemin de vidange entre monticules d'écales.



Embarquement des pavés au port de Valvins. Extrait de l'Illustration 17 octobre 1846. Collection de la ville de Fontainebleau. Bibliothèque municipale.

Dans le contrebas ouest de la Croix du Calvaire subsistent **des traces de mortaise** qui illustrent le procédé principal utilisé pour abattre et débiter les blocs. Domet (1873) en donne une description "*On creuse, au moyen de marteaux pointu, des mortaises dans lesquelles on introduit ensuite des coins en fer qui , enfoncés à tour de bras, font fendre les blocs de grès"* et Dupain (1881) précise "un *ouvrier assis sur le bloc commence par creuser une gouttière (mortaise) où il introduit deux planchettes en fer et un coin (ou plusieurs) au milieu… On opère la cassure en déchargeant de très haut sur le coin engagé entre les planchettes, de grands coups d'une masse de fer dont le manche est long et flexible. Chaque coup imprime et transmet dans toutes les molécules de l'épaisseur du banc… une secousse profonde et un ébranlement violent et comme l'effort du coin est à la fois vertical et latéral, le bloc finit par se fendre et la dalle s'en sépare*".



Traces de mortaise dans le contrebas ouest de la Croix du Calvaire

Fracturation des grès : les faits et les contraintes.

L'orientation commune des fractures et des platières fut un temps utilisée pour relier la grésification à des couloirs tectoniques (Obert et Pomerol, 1985). La restriction des grès aux zones d'affleurement et leur âge récent rendent caduque l'hypothèse tectonique (Thiry et al., 2017). Mais les fractures existent, elles sont post-silicification quaternaire, et sont dues à des contraintes mécaniques liées à l'affleurement.

Ce sont surtout les grandes fractures verticales des platières gréseuses qui ont été décrites et discutées. En revanche, il n'a jamais été fait grand cas des fractures horizontales, serrées, presque partout présentes à la base des escarpements de grès. Les deux systèmes doivent être pris en compte.

Contexte général

En l'absence de toute couverture sédimentaire épaisse, les grès n'étant pas enchâssés (confinés) dans le sable, il n'est pas envisageable de fracturer les dalles de grès par des contraintes "extérieures" (serrages ou cisaillements tectoniques). L'application de pressions/contraintes fortes tendrait à faire "chasser" les lentilles de grès vers le haut, mais ne les briserait pas.

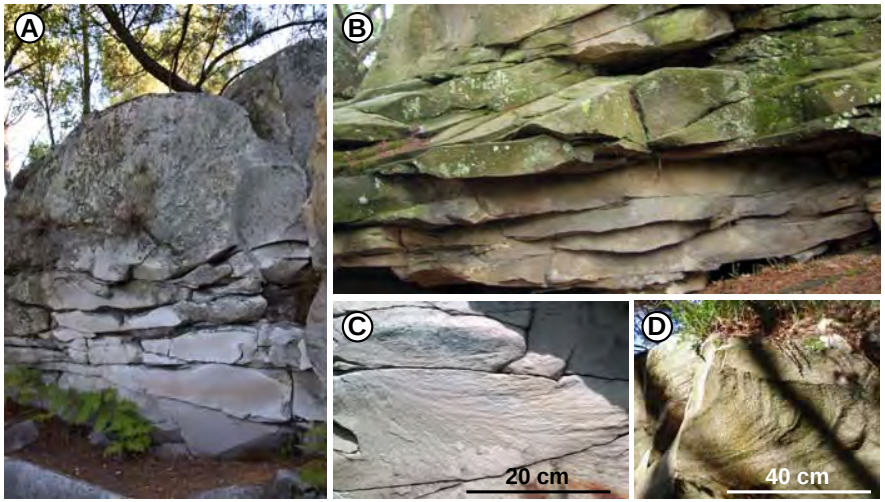
Par ailleurs, les dalles de grès sous couverture calcaire ne sont pas fracturées (Thiry et al., 1984). Même les dalles d'épaisseur réduite (décimétrique) ne sont pas fracturées. En revanche, à l'affleurement, sur les platières, la fracturation est forte et même souvent spectaculaire. Cette fracturation est donc consécutive à la mise à l'affleurement des grès. On distingue : (1) de grandes fractures verticales espacées de 1 à 5 m, qui peuvent parfois être suivies sur plusieurs décamètres ; (2) des fractures verticales transverses qui recoupent les lanières précédentes, leur espacement moyen est de 5 à 10 m ; (3) des fractures plus ou moins horizontales qui se développent dans la moitié inférieure des dalles gréseuses.



Dislocation d'une platière par des fractures verticales. Apremont (01/2009) avec voile de neige sur les blocs. Photo © Pascal Crapet.

Les **fractures verticales** majeures sont de direction moyenne N110, parallèles aux alignements gréseux. Elles délimitent des damiers géants spectaculaires sur les images Google Earth. Elles "s'ouvrent" en bordure des platières par glissement des blocs sur la pente. Elles montrent des structures induites par la rupture du grès : linéaments en éventail ou en plume et/ou des crochons d'arrachement. Elles indiquent que des fentes obliques sur la fracture principale se sont formées au moment de la rupture, elles sont classiquement rapportées à des cisaillements, c'est à dire à des tensions plus ou moins parallèles au plan de fracture. Ces fractures ne montrent jamais de stries de glissement des blocs les uns contre les autres, elles ne sont pas en compression, ni en mouvement.

Les **fractures horizontales** sont limitées à la partie inférieure des escarpements de grès. Elles débitent le grès de manière spectaculaire en lames horizontales d'épaisseur déci- à centimétriques. Elles sont légèrement pentées (inclinées) et forment des systèmes conjugués qui déterminent des losanges très aplatis. Ce système résulte de tensions en cisaillement dans le plan horizontal. Des déplacements infimes le long de ces fractures permettent un raccourcissement ou un allongement par glissement des losanges à la manière de sardines dans une boîte. En tout état de cause elles traduisent un comportement différentiel de la partie supérieure et inférieure de la dalle de grès. Les fractures horizontales disparaissent assez rapidement en s'éloignant de l'escarpement, comme le montrent les anciennes carrières de grès. Elles montrent des ondulations concentriques autour d'un bulbe qui semble correspondre à un point de compression à l'origine de la fracture. Les fractures verticales recoupent les piles d'assiettes, elles sont postérieures à la fracturation horizontale.



Fracturation des grès en bordure d'escarpement. (A) – Enduit de silice lustrée post-fractures. Maison Poteau, P114. (B) – Fractures plates conjuguées en losanges très aplatis. Croix du Calvaire, P387. (C) – Linéaments en éventail. Croix du Calvaire, P387. (D) – Figures "ondes de choc" sur fractures plates. Mont Ussy, P263.

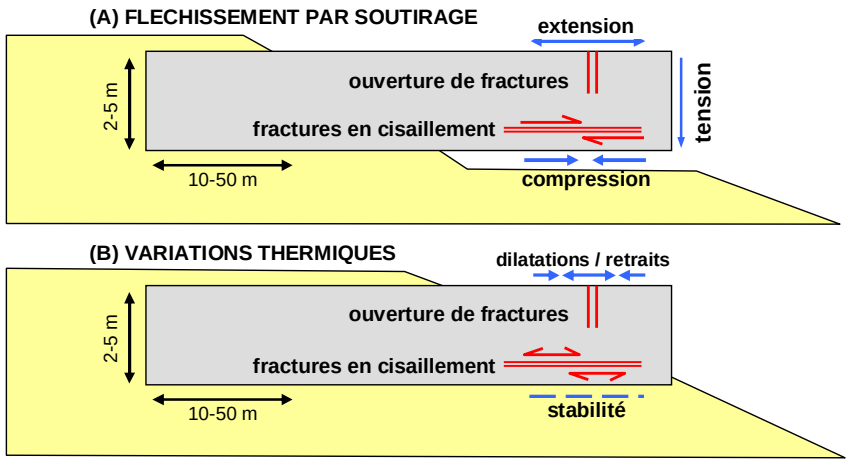
Mécanismes de la fracturation

Toutes les observations concordent pour montrer que les fractures sont dues à un mécanisme de rupture des dalles de grès à l'affleurement. La coïncidence entre l'orientation des fractures et des platières (alignements dunaires) doit être mise sur le compte d'un guidage des fractures par les escarpements des platières. Deux mécanismes de fracturation peuvent être envisagés (Thiry *et al.*, 2017).

(1) Le soutirage du sable sous la dalle de grès (par érosion et/ou dissolution) mettrait celle-ci en porte-à-faux. La dalle n'étant plus soutenue subirait un fléchissement et se fracturerait sous son propre poids.

(2) Les variations de température dans la dalle de grès sont à l'origine de dilatations/rétractions. L'augmentation en température provoque la dilatation du grès et des contraintes de compression, l'abaissement de la température provoque sa contraction et génère des tensions.

Dans les deux cas il y a comportement différentiel de la partie supérieure et inférieure de la dalle. En cas de soutirage du sable, la partie supérieure de la dalle est en extension, mais la partie inférieure est en compression. En cas de variation de température, celle-ci affectera la partie supérieure de la dalle car la température des terrains en profondeur présente une inertie par rapport aux variations atmosphériques, de ce fait il y aura aussi comportement différentiel entre la base et le sommet de la dalle. Dans les deux cas, ce comportement différentiel génèrera un cisaillement à la base de la dalle de grès qui serait à l'origine des fractures horizontales, et expliquerait que les fractures horizontales sont limitées à la partie inférieure des dalles des platières



Régime des tensions envisageables dans une dalle de grès à l'affleurement.

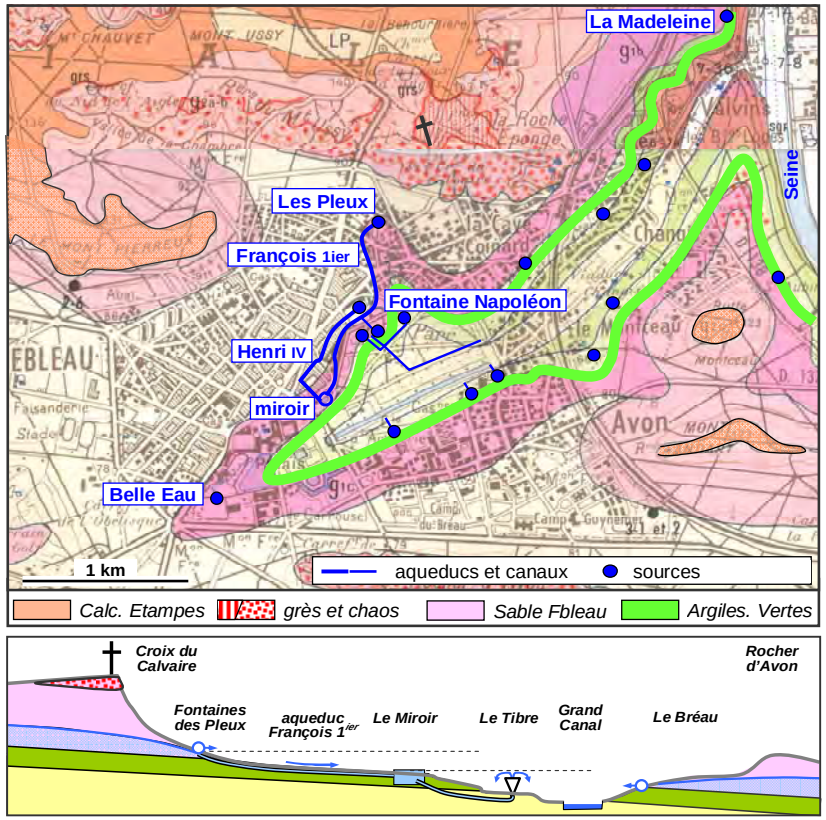
La cuvette de Fontainebleau

La nature et la disposition géométrique des terrains ont fait le site de Fontainebleau … par le sable et la forêt qu'il supporte qui est le cadre de la chasse royale … par l'hydrogéologie qui a permis l'aménagement des jeux d'eau du Palais.

Des sources existent au-dessus du niveau imperméable des Argiles Vertes. L'eau est amenée à un réservoir principal, Le Miroir, et de là alimente certaines pièces d'eau des jardins et le Grand Canal.

D'autres venues d'eau existent sur les flancs de la cuvette, en particulier au sud, dans le secteur du Bréau, elles sont captées et directement dirigées dans le Grand Canal. Ce sont les zones où la glace ne se forme pas quand le canal est gelé.

Les eaux captées par les aqueducs au pied des sables du rebord Nord de la cuvette alimentent les jeux d'eau à partir d'un réservoir en hauteur des jardins.



Hydrogéologie et aménagements hydrauliques de la cuvette de Fontainebleau.

Épilogue

Les Sables et Grès de Fontainebleau sont exceptionnels par leur géologie et par l'empreinte périglaciaire qui a complètement transformé le dépôt sédimentaire originel.

Mais toute cette histoire tardive n'a été révélée que grâce à la richesse exceptionnelle des affleurements du Massif de Fontainebleau et la densité des données de sondage et de carrière en région urbanisée. Cette masse d'informations, mise progressivement en cohérence durant les 20 dernières années, a conduit à ce modèle complètement nouveau, qui n'avait jamais été envisagé et qui remet en cause nombre de "vérités" et de dogmes encore en usage ailleurs, tant dans le Bassin de Paris, qu'en Europe du Nord-Ouest. Sûr que dans les 20 prochaines années nombre de concepts mis en évidence à Fontainebleau seront appliqués ailleurs … précisés, clarifiés, nuancés, … et certains remis en cause pour permettre à d'autres idées d'émerger et de faire progresser la connaissance.

Références

Alimen H., 1936, Etude sur le Stampien du Bassin de Paris. Mém. Soc. Géol. Fr., 31, 309 p., 4 pl. h.t.

Bariteau A., 1996, Modélisation géochimique d'un aquifère : la nappe de l'Oligocène en Beauce et l'altération des Sables de Fontainebleau. Mém. Sci. de la Terre, ENSMP, 28, 178 p.

Denecourt C.F.,1868, Indicateur de Fontainebleau, 17e édition, Fontainebleau, Editeur Denecourt.

Dollfus G.F., 1911, Feuilles de Fontainebleau et de Châteaudun au 80 000. Bull. Serv. Carte Géol. Fr., XXI, 128, p. 8-30.

Domet P., 1873, *Histoire de la forêt de Fontainebleau*, Hachette, 404 p.

Dupain S., 1881, Notice historique sur le pavé de Paris depuis Philippe Auguste jusqu'à nos jours, 33 p.

Herbet F., 1898, Les carriers de la forêt de Fontainebleau au XVIIème siècle, Fontainebleau, Bourges éditeur, 1898, 16 p.

Obert D., Pomerol Ch., 1985, Les alignements gréseux de Fontainebleau. Le point des connaissances, la crédibilité des hypothèses. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 22/2, p. 3-9.

Thiry M., 2016, Les Calcites de Fontainebleau : occurrence et genèse. Bull. Ass. Naturalistes de la Vallée Loing, 89(3), p. 111-133.

Thiry M., Liron M.N., Dubreucq P., Polton J.-C., 2017, Curiosités géologiques du massif de Fontainebleau. Guide géologique, BRGM Editions, 115 p.

Thiry M., Panziera J.-P., Schmitt J.-M.., 1984, Silicification et désilicification des grès et des sables de Fontainebleau. Évolutions morphologiques des grès dans les sables et à l'affleurement. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 21/2, p. 23-32.

Thiry M., Schmitt J.-M., Innocent C., Cojan I., 2013, Sables et Grès de Fontainebleau : que reste-t-il des faciès sédimentaires initiaux ? 14ème Congrès Français de Sédimentologie, Paris 2013, Trois excursions géologiques en région parisienne, Livre des excursions, *Publ. ASF*, n°74, p. 37-90.